

# Analyse de la variabilité naturelle du climat : application à l'aide des ondelettes

Georges Mabile

Défense publique – dissertation

10/09/2014



# Plan

- 1 Introduction
  - La variabilité climatique
  - L'objet de la recherche
- 2 Description de la méthode
- 3 Les séries températures
- 4 Les indices climatiques
- 5 L'activité du Soleil
- 6 Conclusions

# À propos de la variabilité climatique...

## Vers un été pourri? Les températures trop basses pour la période

Sofia Douleb (St.)

Mis en ligne jeudi 10 juillet 2014, 12h25

Un temps pluvieux et froid s'abat sur notre pays. Est-ce normal ? Voici ce qu'en disent les climatologues.



[[www.lesoir.be](http://www.lesoir.be)]

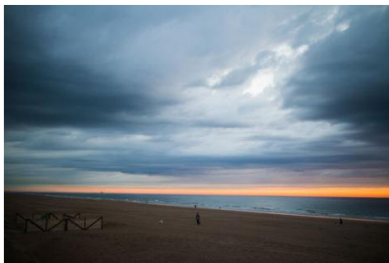
## À propos de la variabilité climatique...

### Météo: canicule ce samedi, retour des nuages et de l'orage dimanche

Rédaction en ligne

Mis en ligne samedi 19 juillet 2014, 9h54

Il faut s'attendre à 33 degrés dans l'intérieur du pays.



[[www.lesoir.be](http://www.lesoir.be)]

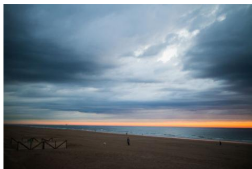


## À propos de la variabilité climatique...

### Météo: canicule ce samedi, retour des nuages et de l'orage dimanche

Rédaction en ligne  
Météo en ligne samedi 19 juillet 2014, 08:54

Il faut s'attendre à 33 degrés dans l'intérieur du pays.



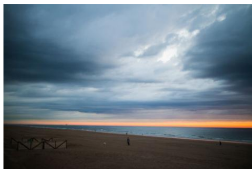
- 1 La variabilité du climat apporte du bruit aux séries de données temporelles. Elle fait d'elles des signaux chaotiques

## À propos de la variabilité climatique...

### Météo: canicule ce samedi, retour des nuages et de l'orage dimanche

Rédaction en ligne  
Météo en ligne samedi 19 juillet 2014, 06:54

Il faut s'attendre à 33 degrés dans l'intérieur du pays.



- 1 La variabilité du climat apporte du bruit aux séries de données temporelles. Elle fait d'elles des signaux chaotiques
- 2 La variabilité, qui reste incomprise, est alors souvent qualifiée de « naturelle »

# Introduction

L'objet de la recherche est

## Introduction

L'objet de la recherche est de mieux comprendre la variabilité du climat,

# Introduction

L'objet de la recherche est de mieux comprendre la variabilité du climat,

- 1 en recherchant de nouveaux cycles dans les séries temporelles de données liées à la climatologie,

# Introduction

L'objet de la recherche est de mieux comprendre la variabilité du climat,

- 1 en recherchant de nouveaux cycles dans les séries temporelles de données liées à la climatologie,
- 2 en quantifiant l'importance de ces cycles,

# Introduction

L'objet de la recherche est de mieux comprendre la variabilité du climat,

- ① en recherchant de nouveaux cycles dans les séries temporelles de données liées à la climatologie,
  - ② en quantifiant l'importance de ces cycles,
- à l'aide d'un nouvel outil encore peu répandu en climatologie.

# Plan

- 1 Introduction
- 2 Description de la méthode
  - Bref aperçu théorique
  - La décomposition en ondelettes
  - Quelques simulations de signaux afin de tester l'outil !
- 3 Les séries températures
- 4 Les indices climatiques
- 5 L'activité du Soleil
- 6 Conclusions



## Des séries de Fourier...

Les séries de Fourier décomposent un signal périodique en une somme de fonctions cosinusoïdales.

## Des séries de Fourier...

Les séries de Fourier décomposent un signal périodique en une somme de fonctions cosinusoidales.

Ainsi, un signal réel  $f$  est décomposé en une somme de  $K$  fonctions cosinusoidales :

$$f(t) \approx \sum_{k=1}^K c_k \cos(\nu_k t + \phi_k).$$

## Des séries de Fourier...

Les séries de Fourier décomposent un signal périodique en une somme de fonctions cosinusoidales.

Ainsi, un signal réel  $f$  est décomposé en une somme de  $K$  fonctions cosinusoidales :

$$f(t) \approx \sum_{k=1}^K c_k \cos(\nu_k t + \phi_k).$$

Cependant une telle décomposition aboutit souvent à un nombre de termes très élevé et fournit dès lors, un  $K$  trop important.

## Des séries de Fourier...

Les séries de Fourier décomposent un signal périodique en une somme de fonctions cosinoïdales.

Ainsi, un signal réel  $f$  est décomposé en une somme de  $K$  fonctions cosinoïdales :

$$f(t) \approx \sum_{k=1}^K c_k \cos(\nu_k t + \phi_k).$$

Cependant une telle décomposition aboutit souvent à un nombre de termes très élevé et fournit dès lors, un  $K$  trop important.

La recomposition du signal est approximative.

## ... aux ondelettes !

Le but est de diminuer  $K$ , le nombre de cosinusoides.

## ... aux ondelettes !

Le but est de diminuer  $K$ , le nombre de cosinusoides.

Pour ce faire, on augmente le nombre de degrés de liberté

## ... aux ondelettes !

Le but est de diminuer  $K$ , le nombre de cosinusoides.

Pour ce faire, on augmente le nombre de degrés de liberté en considérant les amplitudes  $c_k$  comme des fonctions de  $t$ .

## ... aux ondelettes !

Le but est de diminuer  $K$ , le nombre de cosinusoïdes.

Pour ce faire, on augmente le nombre de degrés de liberté en considérant les amplitudes  $c_k$  comme des fonctions de  $t$ . Ainsi la décomposition suivante est obtenue,

$$f(t) \approx \sum_{j=1}^J c_j(t) \cos(\nu_j t + \phi_j),$$

avec  $J \ll K$ .



## ... aux ondelettes !

Ainsi...

$$f(t) \approx \sum_{k=1}^K c_k \cos(\nu_k t + \phi_k).$$

↓

$$f(t) \approx \sum_{j=1}^J c_j(t) \cos(\nu_j t + \phi_j),$$

## ... aux ondelettes !

Ainsi...

$$f(t) \approx \sum_{k=1}^K c_k \cos(\nu_k t + \phi_k).$$

↓

$$f(t) \approx \sum_{j=1}^J c_j(t) \cos(\nu_j t + \phi_j),$$

Et de cette manière d'un  $K$  qui est de l'ordre de plusieurs centaines d'unités, on passe à un  $J$  de quelques unités seulement !

## Le spectre d'échelle

Les cycles sont détectés grâce au spectre d'échelle.

## Le spectre d'échelle

Les cycles sont détectés grâce au spectre d'échelle.

Le spectre d'échelle est l'analogue du spectre de Fourier.

## Le spectre d'échelle

Les cycles sont détectés grâce au spectre d'échelle.

Le spectre d'échelle est l'analogie du spectre de Fourier.

Associé au signal  $f$ , il est défini comme

$$\Lambda\left(\frac{1}{\nu}\right) = E|Wf\left(\cdot, \frac{1}{\nu}\right)|,$$

## Le spectre d'échelle

Les cycles sont détectés grâce au spectre d'échelle.

Le spectre d'échelle est l'analogue du spectre de Fourier.

Associé au signal  $f$ , il est défini comme

$$\Lambda\left(\frac{1}{\nu}\right) = E|Wf\left(\cdot, \frac{1}{\nu}\right)|,$$

avec  $Wf$  la transformée en ondelettes de  $f$  et

## Le spectre d'échelle

Les cycles sont détectés grâce au spectre d'échelle.

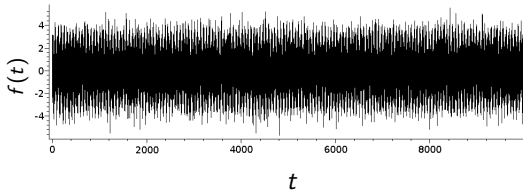
Le spectre d'échelle est l'analogie du spectre de Fourier.

Associé au signal  $f$ , il est défini comme

$$\Lambda\left(\frac{1}{\nu}\right) = E|Wf\left(\cdot, \frac{1}{\nu}\right)|,$$

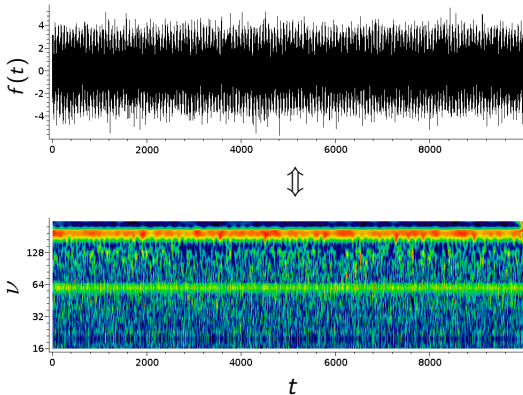
avec  $Wf$  la transformée en ondelettes de  $f$  et  $E$  qui désigne la moyenne au cours du temps  $t$ .

# De la transformée en ondelettes au spectre d'échelle

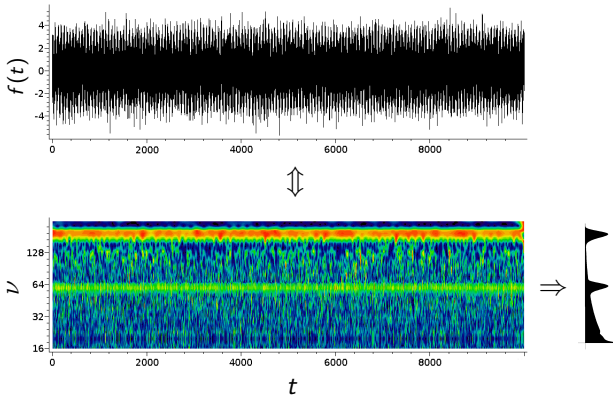




# De la transformée en ondelettes au spectre d'échelle



# De la transformée en ondelettes au spectre d'échelle



## Intérêts de la méthode, de l'outil ondelettes

- la transformée en ondelettes est insensible au bruit,

## Intérêts de la méthode, de l'outil ondelettes

- la transformée en ondelettes est insensible au bruit,
- la transformée en ondelettes est insensible aux tendances.

## Intérêts de la méthode, de l'outil ondelettes

- la transformée en ondelettes est insensible au bruit,
- la transformée en ondelettes est insensible aux tendances.

Ainsi, des tendances n'affectent pas la transformée en ondelettes et le réchauffement climatique n'impacte donc pas la morphologie du spectre d'échelle et les résultats obtenus.

## Simulation 1 : le cycle journalier

La simulation d'une série de données de températures horaires qui comprend un cycle journalier dont

la moyenne est de  $9^{\circ}\text{C}$  et

## Simulation 1 : le cycle journalier

La simulation d'une série de données de températures horaires qui comprend un cycle journalier dont

la moyenne est de  $9^{\circ}\text{C}$  et  
l'amplitude est de  $2.5^{\circ}\text{C}$

$$\nu_1 = \frac{2\pi}{24}$$

et

## Simulation 1 : le cycle journalier

La simulation d'une série de données de températures horaires qui comprend un cycle journalier dont

la moyenne est de  $9^{\circ}\text{C}$  et  
l'amplitude est de  $2.5^{\circ}\text{C}$

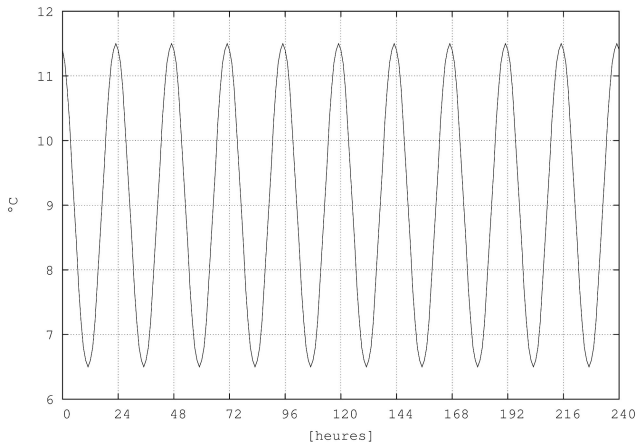
$$\nu_1 = \frac{2\pi}{24}$$

et

$$f_1(t) = 9 + 2.5 \cos(\nu_1 t)$$

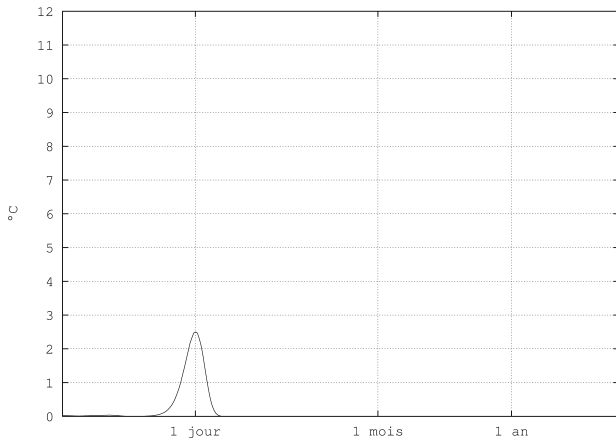


## Simulation 1 : le cycle journalier



### Le signal de la simulation 1

## Simulation 1 : le cycle journalier



Le spectre d'échelle de la simulation 1

## Simulation 2 : les cycles journalier et annuel

Simulation d'une série de données, dont la moyenne est de  $9^{\circ}\text{C}$  et qui est composée de deux cycles, l'un journalier dont l'amplitude est de  $2.5^{\circ}\text{C}$  et

## Simulation 2 : les cycles journalier et annuel

Simulation d'une série de données, dont la moyenne est de  $9^{\circ}\text{C}$  et qui est composée de deux cycles, l'un journalier dont l'amplitude est de  $2.5^{\circ}\text{C}$  et

l'autre annuel, dont l'amplitude est de  $8^{\circ}\text{C}$ .

## Simulation 2 : les cycles journalier et annuel

Simulation d'une série de données, dont la moyenne est de  $9^{\circ}\text{C}$  et qui est composée de deux cycles, l'un journalier dont l'amplitude est de  $2.5^{\circ}\text{C}$  et

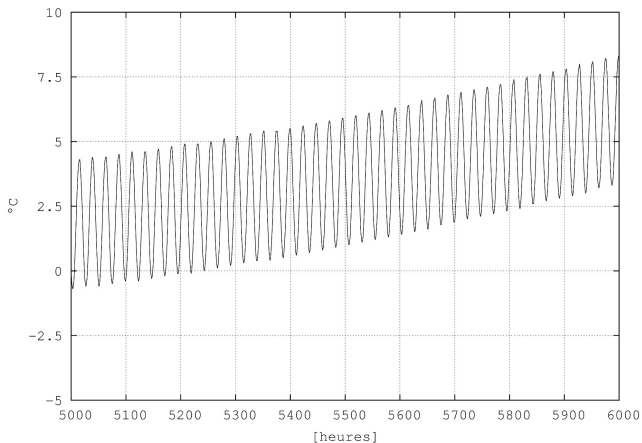
l'autre annuel, dont l'amplitude est de  $8^{\circ}\text{C}$ .

$$\nu_2 = \frac{2\pi}{24} \frac{1}{365.25},$$

alors

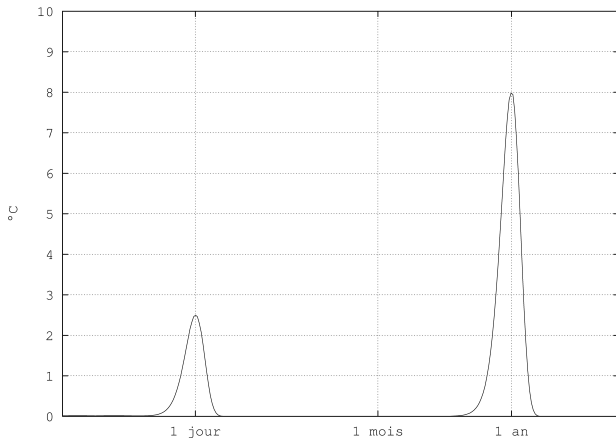
$$f_2(t) = 9 + 2.5 \cos(\nu_1 t) + 8 \cos(\nu_2 t).$$

## Simulation 2 : les cycles journalier et annuel



Le signal de la simulation 2

## Simulation 2 : les cycles journalier et annuel



Le spectre d'échelle de la simulation 2

## Simulation 3 : l'ajout d'un bruit gaussien

Ajoutons un bruit gaussien  $n$  à la simulation 2.



## Simulation 3 : l'ajout d'un bruit gaussien

Ajoutons un bruit gaussien  $n$  à la simulation 2.

Ce bruit est caractérisé par un écart-type de  $4.4^{\circ}\text{C}$  estimé à partir des écarts à la moyenne des températures relevées toutes les heures, à la station météorologique de Bierset.

## Simulation 3 : l'ajout d'un bruit gaussien

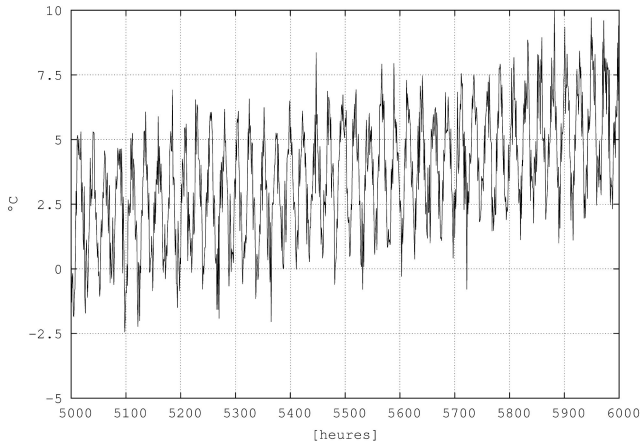
Ajoutons un bruit gaussien  $n$  à la simulation 2.

Ce bruit est caractérisé par un écart-type de  $4.4^{\circ}\text{C}$  estimé à partir des écarts à la moyenne des températures relevées toutes les heures, à la station météorologique de Bierset.

Le signal devient,

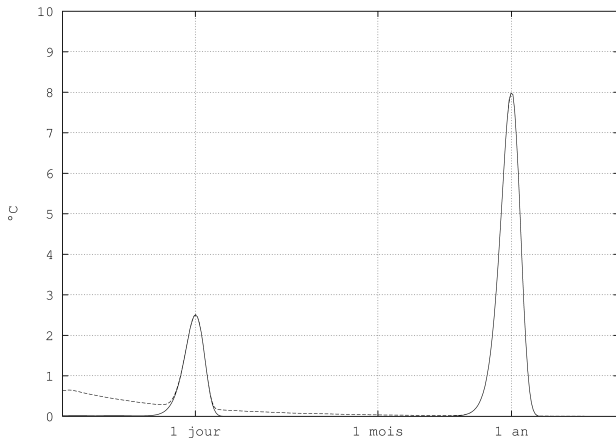
$$f_3(t) = 9 + 2.5 \cos(\nu_1 t) + 8 \cos(\nu_2 t) + n(t),$$

## Simulation 3 : l'ajout d'un bruit gaussien



Le signal de la simulation 3

## Simulation 3 : l'ajout d'un bruit gaussien



Le spectre d'échelle de la simulation 3

## Simulation 4 : l'ajout d'une tendance sur la moyenne

Nous pouvons aussi nous interroger de ce que pourrait devenir un maximum du spectre d'échelle si une tendance linéaire existait dans la série temporelle.

## Simulation 4 : l'ajout d'une tendance sur la moyenne

Nous pouvons aussi nous interroger de ce que pourrait devenir un maximum du spectre d'échelle si une tendance linéaire existait dans la série temporelle.

Construisons un tel signal en intégrant une tendance de  $4^{\circ}\text{C}$  sur 60 ans (526000 heures).

## Simulation 4 : l'ajout d'une tendance sur la moyenne

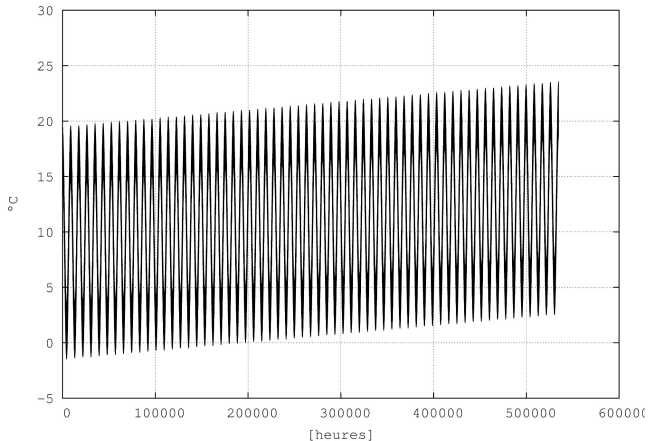
Nous pouvons aussi nous interroger de ce que pourrait devenir un maximum du spectre d'échelle si une tendance linéaire existait dans la série temporelle.

Construisons un tel signal en intégrant une tendance de 4°C sur 60 ans (526000 heures).

La fonction suivante simule un tel signal :

$$f_4(t) = f_2(t) + \frac{4t}{526000}$$

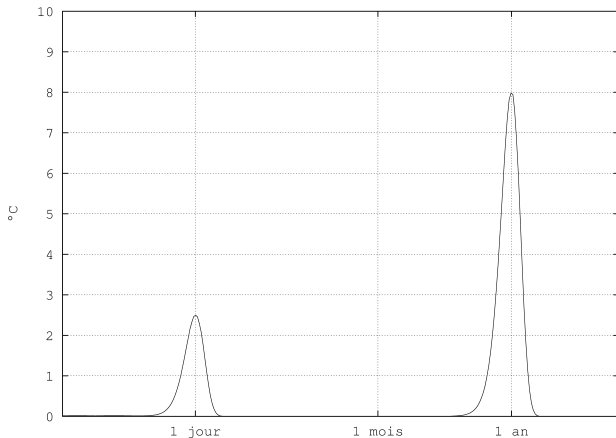
## Simulation 4 : l'ajout d'une tendance sur la moyenne



Le signal de la simulation 4



## Simulation 4 : l'ajout d'une tendance sur la moyenne

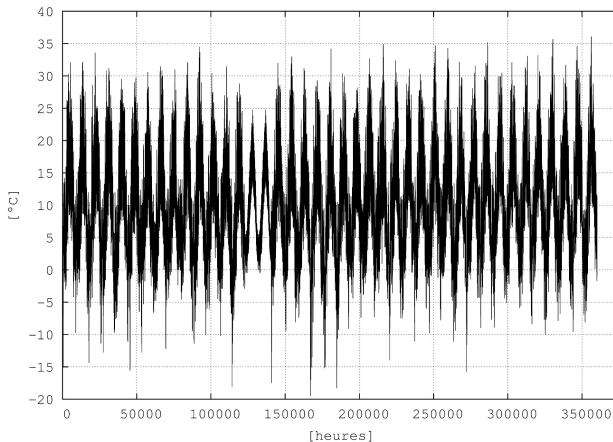


Les spectres d'échelle des simulations 2 et 4 sont confondus

# Plan

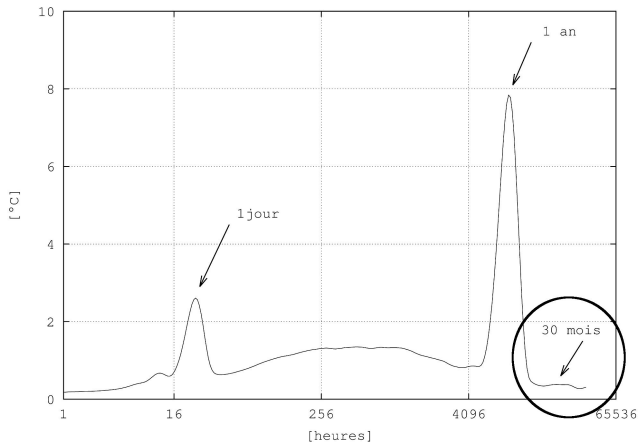
- 1 Introduction
- 2 Description de la méthode
- 3 Les séries températures**
  - Les données de Bierset
  - Les données de Verhojansk
  - Les données de Lander
  - Les données de Saint-Louis
  - Les séries de données GISS continentales
- 4 Les indices climatiques
- 5 L'activité du Soleil
- 6 Conclusions

## Bierset, données horaires, de 1966 à 2006



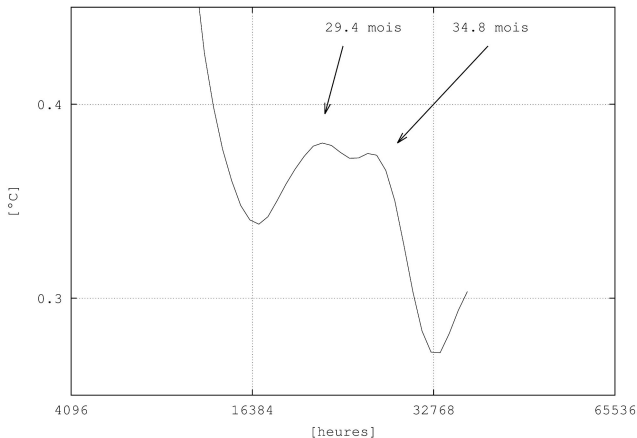
La série temporelle de températures de Bierset

## Le spectre d'échelle de la série de Bierset



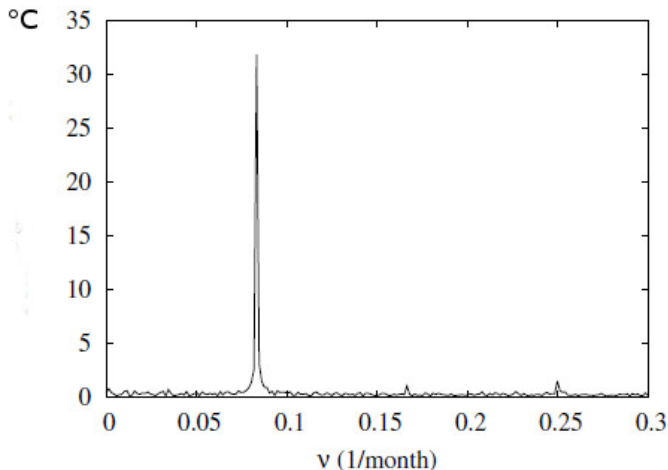
Le spectre d'échelle des données de Bierset

## Zoom sur les basses fréquences du spectre de Bierset

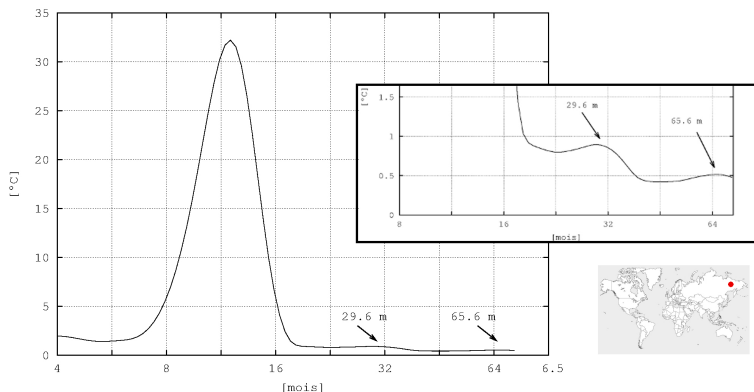


Le zoom sur les basses fréquences du spectre

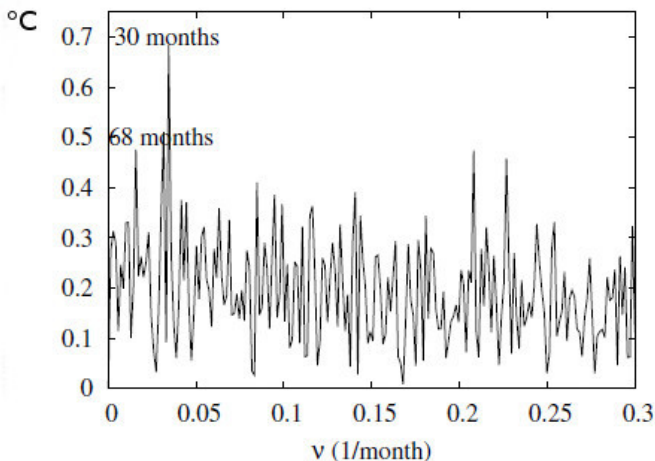
## Les spectres de Fourier des données de Verhojansk



# Le spectre d'échelle de la série de données de Verhojansk

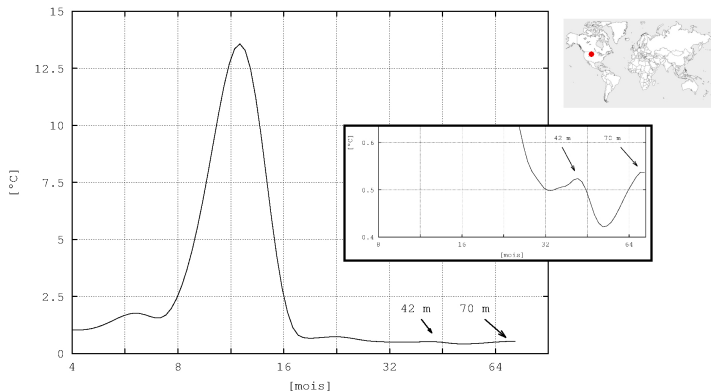


## Le spectre de Fourier de la série de données de Verhojansk



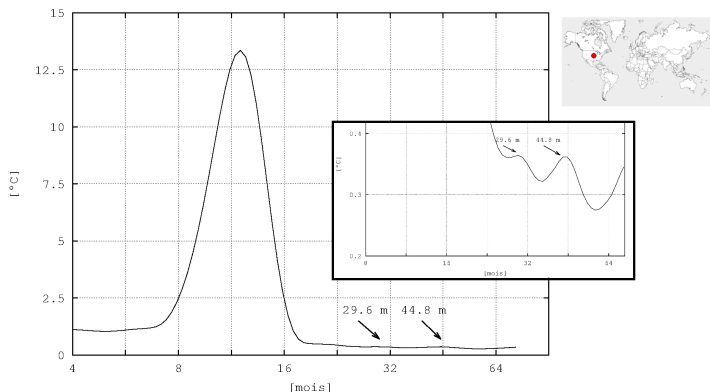


## Le spectre d'échelle de la série de données de Lander



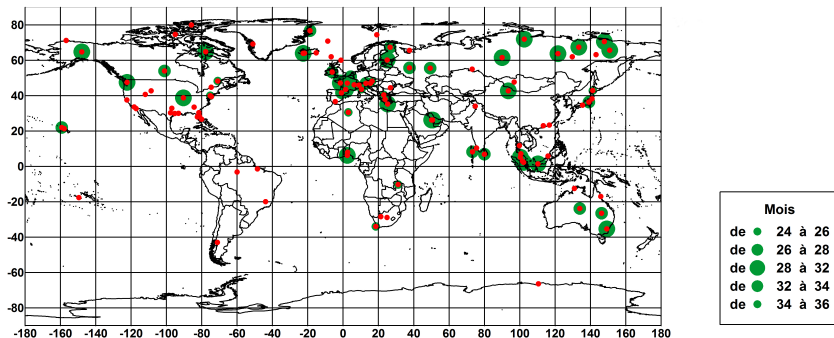
Le spectre d'échelle, et le cycle de 43 mois environ

## Le spectre d'échelle de la série de données de Saint-Louis



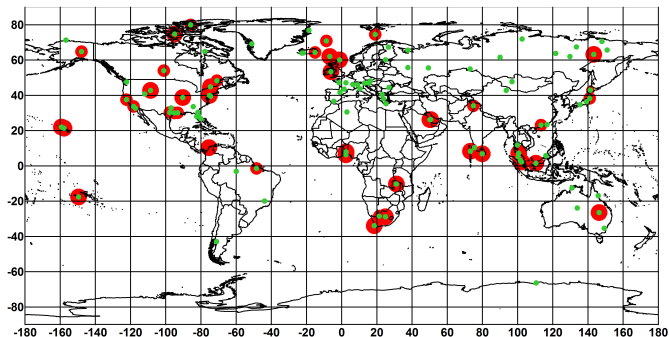
Le spectre d'échelle, et le cycle de 43 mois environ

## Les stations GISS : le cycle de 30 mois



Les points rouges correspondent à la localisation des stations GISS

## Les stations GISS : le cycle de 43 mois



Les points verts correspondent à la localisation des stations GISS

## Localisations des stations concernées par ces cycles

### Le cycle de 30 mois

- 1 surtout aux hautes et moyennes latitudes de l'hémisphère nord
- 2 en Europe occidentale et dans le nord de l'Asie
- 3 en bordure de l'océan Indien

## Localisations des stations concernées par ces cycles

### Le cycle de 30 mois

- 1 surtout aux hautes et moyennes latitudes de l'hémisphère nord
- 2 en Europe occidentale et dans le nord de l'Asie
- 3 en bordure de l'océan Indien

### Le cycle de 43 mois

- 1 surtout dans la zone intertropicale
- 2 sur le continent nord-américain
- 3 dans les îles du nord de l'océan Atlantique

## Localisations des stations concernées par ces cycles

### Le cycle de 30 mois

- 1 surtout aux hautes et moyennes latitudes de l'hémisphère nord
- 2 en Europe occidentale et dans le nord de l'Asie
- 3 en bordure de l'océan Indien

### Le cycle de 43 mois

- 1 surtout dans la zone intertropicale
- 2 sur le continent nord-américain
- 3 dans les îles du nord de l'océan Atlantique

### Le cycle de 65 mois

- 1 presque partout

# Plan

- 1 Introduction
- 2 Description de la méthode
- 3 Les séries températures
- 4 Les indices climatiques**
  - Les moyennes latitudes
  - Les latitudes intertropicales
- 5 L'activité du Soleil
- 6 Conclusions



## Pourquoi la présence d'un cycle de 30 mois aux hautes et moyennes latitudes ?

Le rôle des oscillations dans la circulation atmosphérique et  
l'analyse de l'oscillation nord-atlantique...

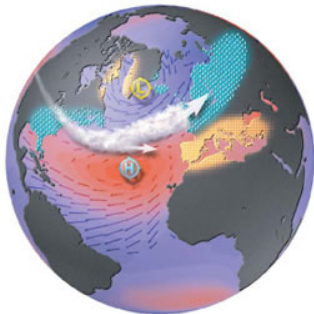
## Pourquoi la présence d'un cycle de 30 mois aux hautes et moyennes latitudes ?

Le rôle des oscillations dans la circulation atmosphérique et  
l'analyse de l'oscillation nord-atlantique...

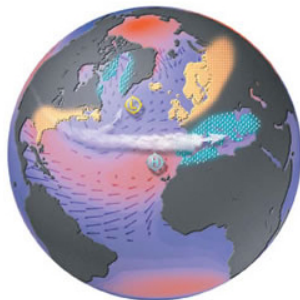
Elle se mesure généralement comme la différence de pression  
atmosphérique entre l'anticyclone des Açores et la dépression  
d'Islande.

# L'oscillation nord-atlantique

**NAO<sup>+</sup>: Positive Phase of the NAO**

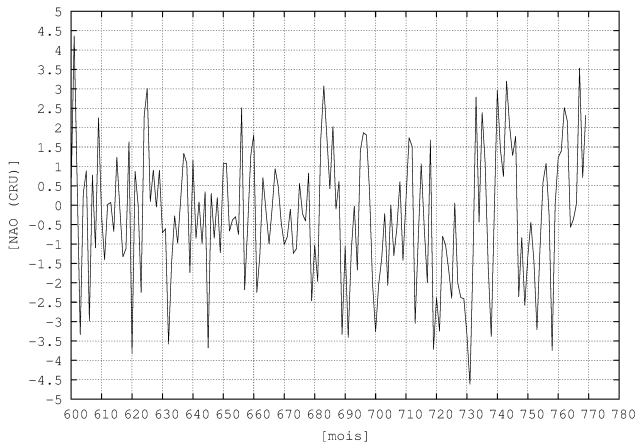


**NAO<sup>-</sup>: Negative Phase of the NAO**



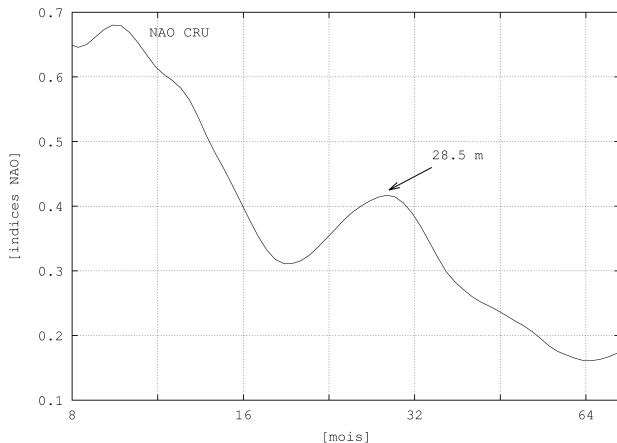
Les téléconnexions de la NAO [NOAA]

## La série de données de la NAO (CRU)



Les données de la série de la NAO (CRU), de 1950 à 2013

## Le spectre de la NAO (CRU)



## Le spectre de la NAO (CRU)

## Pourquoi la présence d'un cycle de 43 mois ?

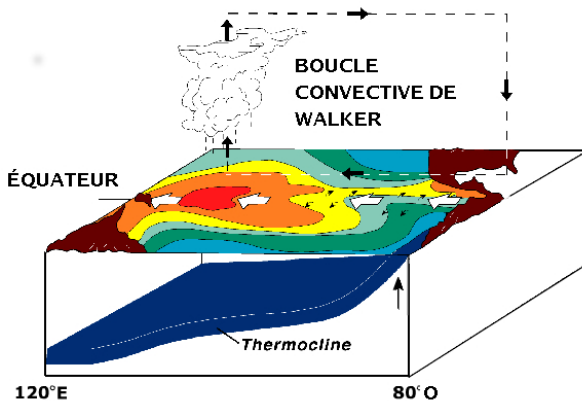
Le rôle des oscillations dans la circulation atmosphérique et l'analyse de l'oscillation australe (ENSO)...

## Pourquoi la présence d'un cycle de 43 mois ?

Le rôle des oscillations dans la circulation atmosphérique et l'analyse de l'oscillation australe (ENSO)...

ENSO est une oscillation climatique et océanographique révélé par le phénomène *El Niño* et celui de la *La Niña*.

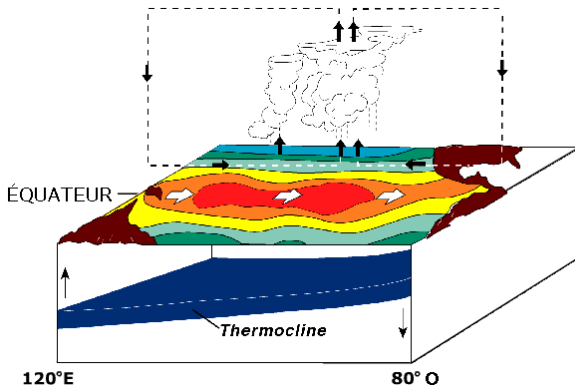
## L'oscillation australe : situation normale



[Source : NOAA]

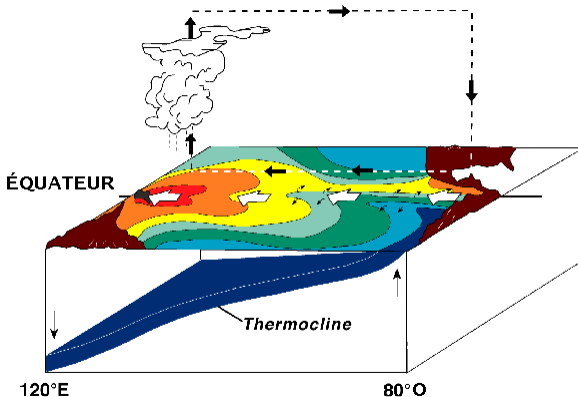


## L'oscillation australe : El Niño - ENSO +



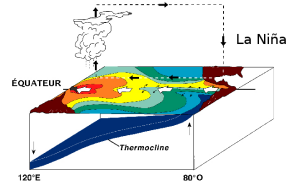
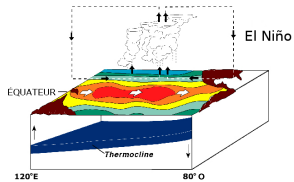
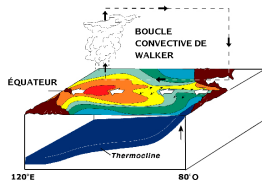
[Source : NOAA]

## L'oscillation australe : La Niña - ENSO -



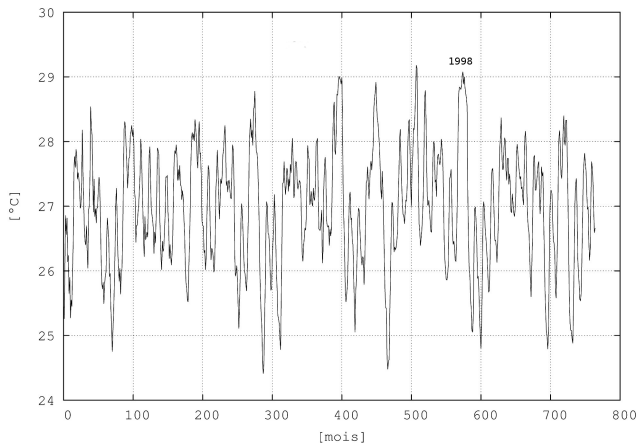
[Source : NOAA]

# L'oscillation australe



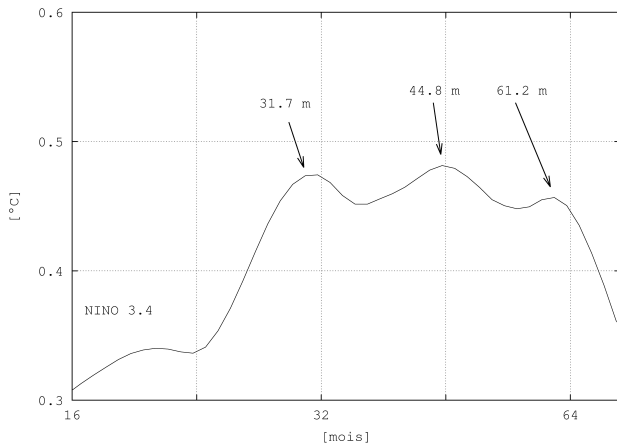
[Source : NOAA]

## La série de données de l'ENSO (région 3.4 CPC)



La série de données de 1950 à 2013

## Le spectre de l'ENSO (région 3.4 CPC)



### Le spectre d'échelle

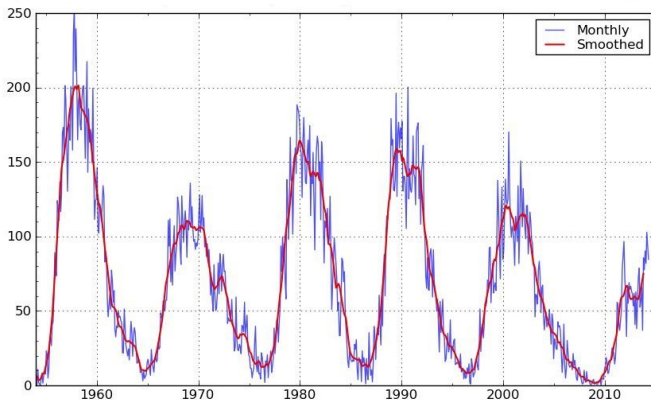
# Plan

- 1 Introduction
- 2 Description de la méthode
- 3 Les séries températures
- 4 Les indices climatiques
- 5 L'activité du Soleil**
  - Les taches solaires
  - Le Soleil et la genèse des cycles
- 6 Conclusions

## Le Soleil est-il lié à l'existence de ces cycles ?

Quel est le rôle de l'activité solaire ?

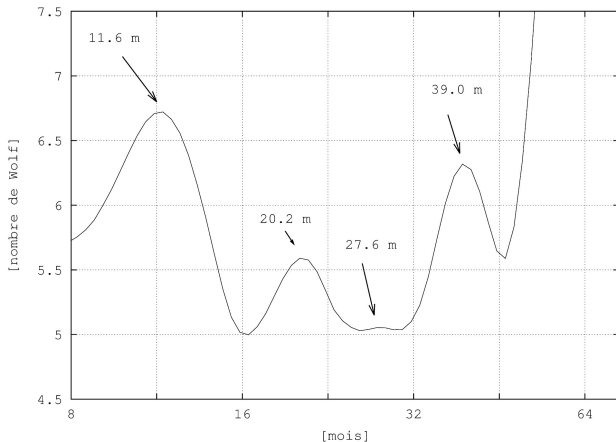
# Les taches solaires



Les 6 derniers cycles de 11 ans



# Les taches solaires



## Le spectre d'échelle

## L'action du Soleil sur la genèse de ces cycles...

La variation de l'activité solaire contribue à moduler

## L'action du Soleil sur la genèse de ces cycles...

La variation de l'activité solaire contribue à moduler

- 1 la quantité d'énergie émise et celle reçue sur la Terre

## L'action du Soleil sur la genèse de ces cycles...

La variation de l'activité solaire contribue à moduler

- 1 la quantité d'énergie émise et celle reçue sur la Terre mais cette faible variation d'énergie n'explique pas totalement une variation aussi importante de la température,

## L'action du Soleil sur la genèse de ces cycles...

La variation de l'activité solaire contribue à moduler

- 1 la quantité d'énergie émise et celle reçue sur la Terre mais cette faible variation d'énergie n'explique pas totalement une variation aussi importante de la température,
- 2 le flux du rayonnement cosmique reçu sur la Terre et son action potentielle sur la nébulosité,

## L'action du Soleil sur la genèse de ces cycles...

La variation de l'activité solaire contribue à moduler

- 1 la quantité d'énergie émise et celle reçue sur la Terre mais cette faible variation d'énergie n'explique pas totalement une variation aussi importante de la température,
- 2 le flux du rayonnement cosmique reçu sur la Terre et son action potentielle sur la nébulosité,
- 3 les circulations des masses d'air stratosphériques,

## L'action du Soleil sur la genèse de ces cycles...

La variation de l'activité solaire contribue à moduler

- 1 la quantité d'énergie émise et celle reçue sur la Terre mais cette faible variation d'énergie n'explique pas totalement une variation aussi importante de la température,
- 2 le flux du rayonnement cosmique reçu sur la Terre et son action potentielle sur la nébulosité,
- 3 les circulations des masses d'air stratosphériques, la QBO

## L'action du Soleil sur la genèse de ces cycles...

La variation de l'activité solaire contribue à moduler

- 1 la quantité d'énergie émise et celle reçue sur la Terre mais cette faible variation d'énergie n'explique pas totalement une variation aussi importante de la température,
- 2 le flux du rayonnement cosmique reçu sur la Terre et son action potentielle sur la nébulosité,
- 3 les circulations des masses d'air stratosphériques, la QBO et le vortex polaire,



## L'action du Soleil sur la genèse de ces cycles...

La variation de l'activité solaire contribue à moduler

- 1 la quantité d'énergie émise et celle reçue sur la Terre mais cette faible variation d'énergie n'explique pas totalement une variation aussi importante de la température,
- 2 le flux du rayonnement cosmique reçu sur la Terre et son action potentielle sur la nébulosité,
- 3 les circulations des masses d'air stratosphériques, la QBO et le vortex polaire, qui jouent eux-mêmes sur la NAO ainsi que sur

## L'action du Soleil sur la genèse de ces cycles...

La variation de l'activité solaire contribue à moduler

- 1 la quantité d'énergie émise et celle reçue sur la Terre mais cette faible variation d'énergie n'explique pas totalement une variation aussi importante de la température,
- 2 le flux du rayonnement cosmique reçu sur la Terre et son action potentielle sur la nébulosité,
- 3 les circulations des masses d'air stratosphériques, la QBO et le vortex polaire, qui jouent eux-mêmes sur la NAO ainsi que sur la cellule de Walker.

# Plan

- 1 Introduction
- 2 Description de la méthode
- 3 Les séries températures
- 4 Les indices climatiques
- 5 L'activité du Soleil
- 6 Conclusions**
  - Conclusions et perspectives
  - À propos des futures recherches...

## Conclusions et perspectives

- les ondelettes permettent de détecter des cycles dans les températures de l'air et des océans, de l'ordre du dixième de l'amplitude annuelle,

## Conclusions et perspectives

- les ondelettes permettent de détecter des cycles dans les températures de l'air et des océans, de l'ordre du dixième de l'amplitude annuelle,
- elles permettent de détecter des cycles semblables dans les indices climatiques et dans l'activité solaire,

## Conclusions et perspectives

- les ondelettes permettent de détecter des cycles dans les températures de l'air et des océans, de l'ordre du dixième de l'amplitude annuelle,
- elles permettent de détecter des cycles semblables dans les indices climatiques et dans l'activité solaire,
- elles permettent de mieux décrire la variabilité climatique,

## Conclusions et perspectives

- les ondelettes permettent de détecter des cycles dans les températures de l'air et des océans, de l'ordre du dixième de l'amplitude annuelle,
- elles permettent de détecter des cycles semblables dans les indices climatiques et dans l'activité solaire,
- elles permettent de mieux décrire la variabilité climatique,

Notons que les cycles ne sont pas dus au hasard et que nous avons établi leur caractère significatif<sup>1</sup>

<sup>1</sup> S. Nicolay, G. Mabilie, X. Fettweis, and M. Erpicum. A Statistical validation for the cycles found in air temperature data using a Morlet wavelet-based method. *Non Linear Progress in Geophysics*, 17 :269–272, 2010.

## Perspectives...

- Analyse détaillée et systématique du déphasage



## Perspectives...

- Analyse détaillée et systématique du déphasage
- Meilleure compréhension des relations entre les cycles observés sur la Terre et l'activité solaire

## Perspectives...

- Analyse détaillée et systématique du déphasage
- Meilleure compréhension des relations entre les cycles observés sur la Terre et l'activité solaire
- Aide à la prévision (ENSO)...

## Bibliographie

- 30 and 43 months period cycles found in air temperature time series using the Morlet wavelet method, S. Nicolay, **G. Mabile**, X. Fettweis, M. Erpicum, Climate dynamics, 2009
- Multi-year cycles observed in air temperature data and proxy series, **G. Mabile**, S. Nicolay, The European Physical Journal - Special Topics, 2009
- A statistical validation for the cycles found in air temperature data using a Morlet wavelet-based method, S Nicolay, **G. Mabile**, M. Erpicum, X. Fettweis, Nonlinear Processes in Geophysics, 2010
- Découverte d'un nouveau cycle du climat, **G. Mabile**, S. Nicolay, Penser l'espace, 2012
- Étude fréquentielle de données via la transformée en ondelette : application aux cycles climatiques, **G. Mabile**, X. Fettweis, M. Erpicum, S. Nicolay, Bulletin de la Société Géographique de Liège, 2012